

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Разработка математической модели процесса деаэрации перегретой воды при ее попадании в зону разрежения

Ю.Е. Барочкин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, С.Д. Горшенин
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: lgv83@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Удаление растворенных газов за счет вскипания перегретой воды при ее попадании в зону разрежения, называемое начальным эффектом деаэрации, протекает как сопутствующий процесс в различных типах теплоэнергетического оборудования: расширителях конденсатов и продувочной воды, конденсаторах пара, подогревателях некоторых типов. Существуют также деаэрационные устройства, принцип действия которых основан на начальном эффекте деаэрации: кавитационно-струйные, центробежно-вихревые деаэраторы, капельные деаэраторы перегретой воды. Вклад начального эффекта в общую эффективность деаэрации, согласно опубликованным данным, может достигать 80 %, поэтому его необходимо учитывать при расчете рассматриваемого оборудования. Однако в настоящее время отсутствуют математические модели, обеспечивающие расчет начального эффекта деаэрации с приемлемой для решения практических задач точностью. В связи с этим актуальными являются исследования процесса деаэрации воды в рассматриваемых условиях и разработка соответствия математических моделей.

Материалы и методы. Используются методы термодинамики, теории подобия процессов теплообмена, регрессионного анализа и математической статистики, а также опубликованные экспериментальные данные о процессе деаэрации воды за счет начального эффекта в деаэрационных устройствах различных типов.

Результаты. На основе существующей математической модели фазового перехода в перегретой жидкости и полученных экспериментальных данных с использованием методов теории подобия процессов теплообмена разработано замкнутое математическое описание процесса деаэрации перегретой воды при ее попадании в зону разрежения. Выявлено, что основными факторами, определяющими эффективность деаэрации воды в рассматриваемых условиях, являются: уменьшение температуры воды в устройстве, начальный перегрев воды относительно температуры насыщения, гидравлическая нагрузка устройства.

Выводы. Предложенное математическое описание дает возможность рассчитывать эффективность деаэрации с приемлемой для решения практических задач точностью, что позволяет рекомендовать его к использованию при проектировании и наладке теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: термическая деаэрация, начальный эффект деаэрации, перегретая жидкость, десорбция растворенного кислорода, деаэрационное устройство, центробежно-вихревой деаэратор, кавитационно-струйный деаэратор, капельный деаэратор, математическая модель, фазовый переход

Development of a mathematical model of deaeration of superheated water when it hits the rarefaction zone

Yu.E. Barochkin, G.V. Ledukhovsky, V.P. Zhukov, S.D. Gorshenin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lgv83@yandex.ru

Abstract

Background. Removal of dissolved gases by boiling superheated water, when it enters the rarefaction zone, called the initial deaeration effect, proceeds as a concomitant process in various types of heat and power equipment: dilators of condensates and purging water, steam condensers, and some types of heaters. There are also deaeration devices, whose principle of operation is based on the initial deaeration effect: cavitation-jet, centrifugal-vortex deaerators, drop

deaerators of superheated water. The contribution of the initial effect to the overall deaeration efficiency, according to the published data, can reach 80 %, so it must be taken into account when calculating the equipment in question. However, at the present time there are no mathematical models that could calculate the initial deaeration effect with an accuracy acceptable for solving practical problems. All this makes it necessary to study water deaeration process in the considered conditions and to develop suitable mathematical models.

Materials and methods. We have used methods of thermodynamics, theory of similarity of heat and mass transfer processes, regression analysis, mathematical statistics, as well as published experimental data on the process of water deaeration due to the initial effect in deaeration devices of various types.

Results. Based on the existing mathematical model of phase transition in a superheated liquid and obtained experimental data, we have developed a closed mathematical description of deaeration of superheated water when it enters the rarefaction zone by using methods of the theory of similar heat and mass transfer processes. It has been found that the main factors determining the efficiency of water deaeration under the considered conditions are: decrease in water temperature in the device, initial water overheating relative to the saturation temperature, and hydraulic loading of the device.

Conclusions. The proposed mathematical description makes it possible to calculate the effectiveness of the deaeration effect with an accuracy that is acceptable for solving practical problems, which allows us to recommend it for use in the design and adjustment of heat and power equipment.

Key words: thermal deaeration, initial deaeration effect, superheated liquid, desorption of dissolved oxygen, deaeration device, centrifugal-vortex deaerator, cavitation-jet deaerator, drop deaerator, mathematical model, phase transition

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.5.005-011

Введение. Деаэрация перегретой воды, вскипающей при попадании в зону разрежения, встречается в различных элементах теплоэнергетических установок (в расширителях горячих конденсатов и продувочной воды котлов, первых ступенях вакуумных деаэраторов, конденсаторах турбин, подогревателях некоторых типов) и именуется в специальной технической литературе начальным эффектом деаэрации [1]. Опубликованные экспериментальные данные, характеризующие величину начального эффекта для вакуумного деаэратора типа ДСВ [1], свидетельствуют, что максимальное значение доли удаляемого газа за счет начального эффекта по растворенному кислороду достигает 80 %, а в большинстве случаев варьируется в диапазоне от 40 до 60 %. Это указывает на определяющий вклад начального эффекта в общую эффективность деаэрации воды в рассматриваемых условиях.

Известны также деаэрационные устройства, работа которых основана только на начальном эффекте деаэрации, например центробежно-вихревые деаэраторы (ДЦВ) [2], кавитационно-струйные деаэраторы (ДКС) [3], капельные деаэраторы перегретой воды (КД) [1]. Согласно данным [2–4], эффективность таких устройств невелика, и по растворенному кислороду, как правило, не превышает 90 %, по сравнению со значениями 99,5 % и более для струйно-барботажных деаэраторов серии «ДА-м». Однако сравнительно малые габариты и отсутствие потребности в греющем паре делают деаэраторы рассматриваемых типов полезными в отдельных технологических системах ТЭС, где применение аппаратов других типов невозможно [4]: в конденсационных установках турбин; системах водяного

охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением; системах возврата конденсата пара от внешних потребителей и др.

Таким образом, начальный эффект деаэрации необходимо учитывать как при расчете газообмена в элементах оборудования, в котором деаэрация является сопутствующим процессом, так и при проектировании специальных деаэрационных устройств. В настоящее время математические модели, обеспечивающие расчет начального эффекта деаэрации с приемлемой для решения практических задач точностью, отсутствуют [1–7].

Ранее нами в рамках термодинамического подхода получена теоретическая зависимость для расчета эффективности процесса деаэрации воды за счет начального эффекта [7]:

$$\zeta = 1 - \frac{C}{C_0} = 1 - (1 + Ku^{-1}Ar)^{-1}; \quad (1)$$

$$Ar = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} - 1; \quad Ku = \frac{r}{c_p \Delta t},$$

где ζ – эффективность деаэрации, ед.; C и C_0 – массовые концентрации растворенного в воде кислорода соответственно на выходе и входе деаэрационного элемента, мг/дм³; Ar и Ku – критерии соответственно Архимеда и Кутателадзе; $\rho_{ж}$ – плотность воды, кг/м³; $\rho_{п}$ – плотность сухого насыщенного пара при давлении в деаэрационном элементе p_d , кг/м³; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг; c_p – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·град); Δt – уменьшение температуры воды в деаэрационном элементе, °С. Значение r принимается по p_d , а $\rho_{ж}$ и c_p – по средней температуре воды в деаэрационном элементе.

Проведенный в [7] анализ результатов расчета в сопоставлении с экспериментальными данными по ДЦВ и КД показал, что зависимость (1) в большинстве случаев дает завышенные значения эффективности деаэрации, что вполне объяснимо: термодинамический подход не учитывает время пребывания воды в аппарате, а полученные в расчете значения ζ соответствуют асимптотическому по времени состоянию. Таким образом, возникает задача уточнения модели (1) путем введения в нее соответствующей эмпирической поправки.

Методы исследования. Разработка математического описания процесса деаэрации перегретой воды при ее попадании в зону разрежения осуществляется методами теории подобия процессов теплообмена [8, 9]. При этом исходный вид критериального уравнения принимается исходя из теоретических представлений о механизме процесса, то есть в соответствии с моделью (1). Искомые параметры модели вычисляются методами регрессионного анализа (множественной линейной регрессии) и математической статистики [10–12] на основе полученных нами ранее экспериментальных данных по деаэраторам ДЦВ и работающим в режиме перегретой воды капельным деаэрационным устройствам КД [7], а также по деаэраторам ДКС [3, 4]. Процедуры сопоставления альтернативных моделей и определения показателей их точности также основаны на методах теории вероятностей и математической статистики [10–12].

Результаты исследования. Приведенные на рис. 1 экспериментальные данные [3, 4, 7] и результаты расчета по (1) для условий каждого из опытов подтверждают сделанный ранее [7] вывод относительно прогностических свойств исходной модели (1). Очевидным направлением уточнения математической модели является обработка экспериментальных данных методами теории подобия процессов теплообмена [8, 9]. Поскольку исходное критериальное уравнение получено теоретическим путем и соответствует модели (1), спецификация этого уравнения не производится. Искомое уравнение запишем в виде

$$\zeta = 1 - \left(1 + m_0 Ku^{m_1} Ar^{m_2}\right)^{-1}, \quad (2)$$

где m_0 , m_1 и m_2 – коэффициенты регрессии.

Значения m_0 , m_1 и m_2 определены методом множественной линейной регрессии [11] после линеаризации уравнения (2) и составили: $m_0 = 54,14$; $m_1 = -1,21$; $m_2 = 0,47$. Отметим, что полученные значения вполне

согласуются с теоретическими выкладками, отраженными в модели (1).

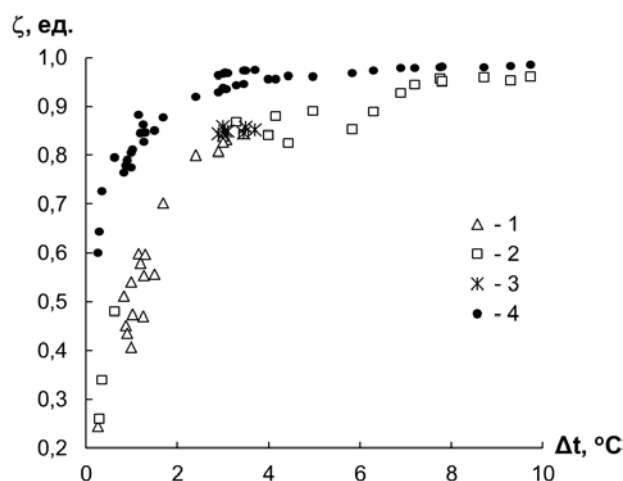


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета по модели (1): 1, 2 и 3 – экспериментальные данные по ДЦВ, КД и ДКС соответственно; 4 – результаты расчета по модели (1) при условиях опытов

Результаты сопоставления рассчитанных по (2) и экспериментальных [3, 4, 7] значений ζ приведены на рис. 2. Проверка адекватности и точности модели (2) [10–12] выявила следующее. Модель (2) адекватна (критерий Фишера 29,4 при критическом значении 1,7). Множественное корреляционное отношение (с учетом поправки на число степеней свободы) составило 0,983 и является статистически значимым (критерий Стьюдента 187,2 при критическом значении 2,0). Среднеквадратическое отклонение результатов расчета по модели (2) от экспериментальных значений по концентрации C составило 18,2 %.

Вместе с тем анализ полученных данных показал, что модель (2) при условиях некоторых опытов дает существенную ошибку, которая зависима от величины начального перегрева воды перед деаэрационным устройством $\Delta t_{вх} = t_{вх} - t_s$, °C ($t_{вх}$ – температура воды на входе; t_s – температура насыщения при δp_d) и относительной гидравлической нагрузки $g = G/G_n$ (G и G_n – текущая и номинальная гидравлическая нагрузка деаэрационного устройства соответственно), косвенно показывающей относительное время пребывания воды в деаэрационном устройстве. Действительно, чем больше время пребывания воды (т. е. чем меньше g) и чем больше отклонение системы на входе в устройство от термодинамически равновесного состояния (т. е. чем больше $\Delta t_{вх}$), тем скорость процесса деаэрации должна быть больше, но модель (2) этого не учитывает.

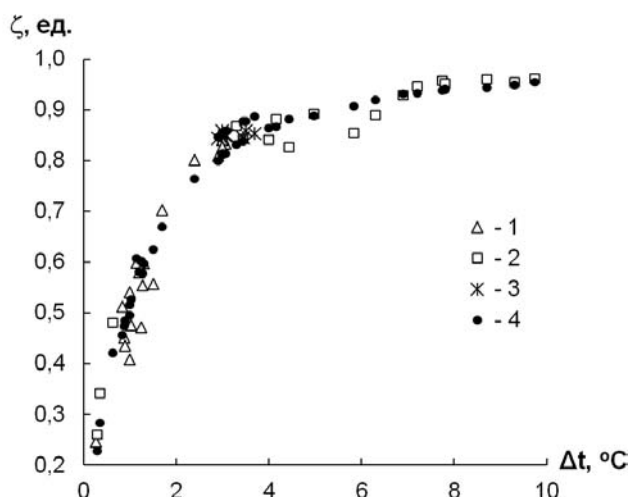


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета по модели (2): 4 – результаты расчета по модели (2) при условиях опытов; прочие обозначения соответствуют рис. 1

Для учета указанных факторов разработана модель (3), соответствующая модели (1) с введением одного параметра идентификации b , для которого, в свою очередь, методом множественной линейной регрессии [11] найдена зависимость вида $b = f(g; \Delta t_{\text{вх}})$:

$$\zeta = 1 - (1 + bKu^{-1}Ar)^{-1}; \quad (3)$$

$$b = 0,37 - 0,18g + 0,0070\Delta t_{\text{вх}}.$$

Результаты расчетов по модели (3) в сопоставлении с экспериментальными данными [3, 4, 7] приведены на рис. 3. Модель (3) также адекватна [10–12] (критерий Фишера 81,6 при критическом значении 1,7). Множественное корреляционное отношение (с учетом поправки на число степеней свободы) равно 0,994 (значимость доказана по критерию Стьюдента, равному 525,3 при критическом значении 2,0).

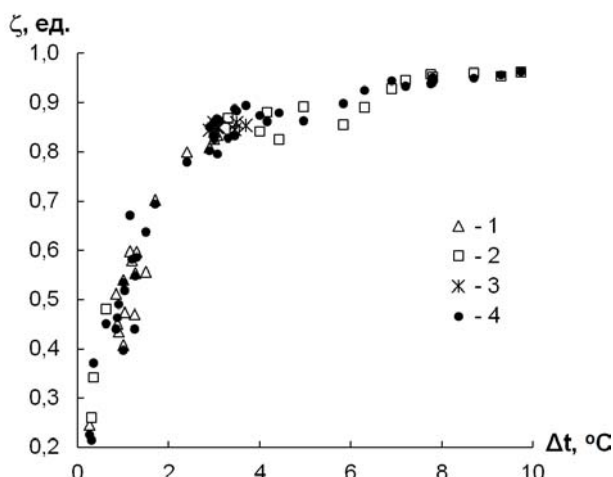


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета по модели (3): 4 – результаты расчета по модели (3) при условиях опытов; прочие обозначения соответствуют рис. 1

Среднеквадратическое отклонение результатов расчета по модели (3) от экспериментальных значений по концентрации C составило 11,6 %. Соотношение расчетных и экспериментальных значений C наглядно демонстрирует корреляционная диаграмма (рис. 4).

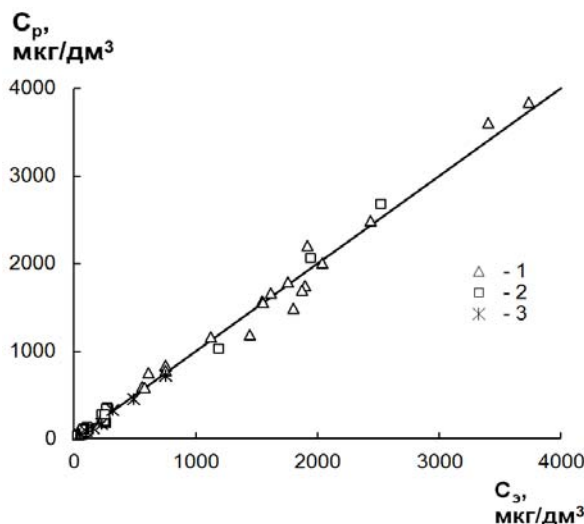


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных и рассчитанных по модели (3) значений массовой концентрации растворенного кислорода в воде на выходе из деаэрационного устройства: C_s и C_p – экспериментальные и расчетные значения концентрации соответственно, мкг/дм³; точки – результаты расчетов для условий опытов (обозначения точек соответствуют рис. 1); линия – совпадение расчетных и экспериментальных значений

Модели (2) и (3) имеют сходные характеристики адекватности и точности. Но модель (3) более полно учитывает факторы, влияющие на эффективность деаэрации воды в рассматриваемых устройствах. Соответственно, возникла задача статистического сопоставления однородности остаточных дисперсий, получаемых при использовании рассматриваемых моделей. Анализ показал, что точность модели (3) статистически значимо отличается от точности модели (2): критерий Фишера, определяющий отношение остаточных дисперсий для рассматриваемых моделей, равен 2,5 при критическом значении 1,7. Таким образом, модель (3) обладает приемлемой точностью и может быть рекомендована к использованию при решении практических задач.

Интерес представляют результаты исследования параметрической чувствительности полученной математической модели. В качестве примера рассматривается деаэратор ДКС номинальной производительностью $G_n = 20$ т/ч, работающий при абсолютном давлении в трубопроводе отсоса выпара $p_d = 0,25$ бар ($t_s = 64,9$ °С; $\rho_n = 0,161$ кг/м³), эксплуатационный диапазон изменения от-

носительной гидравлической нагрузки g от 0,10 до 1,20 ед. Пусть в деаэратор может поступать вода с температурой $t_{вх}$ от 60 до 80 °С, т. е. возможны режимы как с отрицательными, так с относительно большими положительными значениями $\Delta t_{вх}$. На первом этапе будем полагать, что в деаэраторе отсутствуют конструктивные ограничения по максимальному расходу выпара. В этом случае температура воды за деаэратором во всех режимах при положительных $\Delta t_{вх}$ может соответствовать температуре насыщения t_s со средним эксплуатационным недоохлаждением воды 0,2 °С [3, 4]. При отрицательных $\Delta t_{вх}$ значение Δt также примем, в соответствии с эксплуатационными данными [3, 4], равным 0,3 °С. Результаты расчетов при указанных условиях приведены на рис. 5,а.

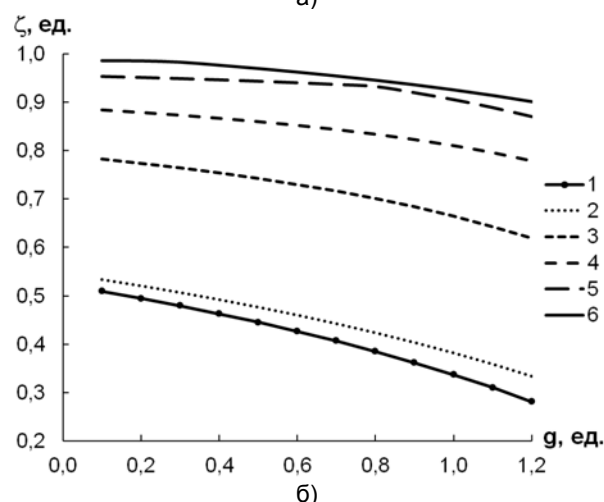
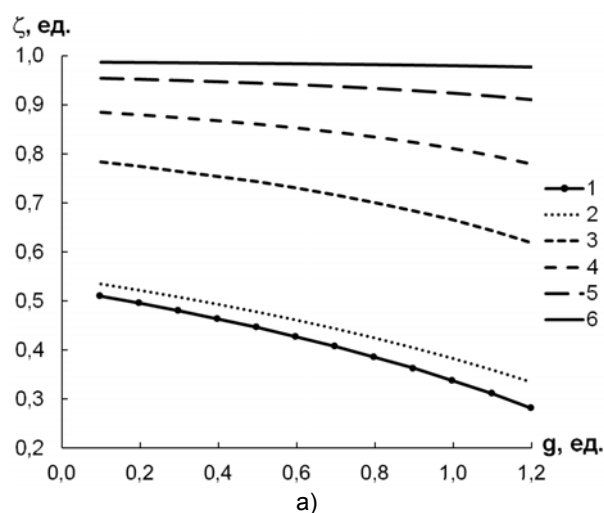


Рис. 5. Результаты исследования параметрической чувствительности модели (3) для деаэратора ДКС-20: а – при отсутствии ограничений по максимальному расходу выпара деаэратора; б – с учетом максимально возможного расхода выпара деаэратора по эксплуатационным данным; 1 – при $t_{вх} = 60$ °С; 2 – при $t_{вх} = t_s$; 3 – при $t_{вх} = 66$ °С; 4 – при $t_{вх} = 67$ °С; 5 – при $t_{вх} = 70$ °С; 6 – при $t_{вх} = 80$ °С

На втором этапе учтен максимально возможный расход выпара деаэратора, обусловленный предельной пропускной способностью начального участка тракта отсоса выпара и для рассматриваемого деаэратора составляющий 0,14 т/ч [3, 4], или около 7 кг выпара на тонну деаэрированной воды при номинальной гидравлической нагрузке. Результаты расчетов, выполненных с учетом указанного ограничения, приведены на рис. 5,б.

Выводы. Полученная математическая модель (3) процесса деаэрации перегретой воды при ее попадании в зону разрежения позволяет учесть влияние на эффект деаэрации следующих режимных параметров деаэрационного устройства: гидравлической нагрузки; давления в рабочей области; начального перегрева воды относительно температуры насыщения; уменьшения температуры воды при ее вскипании. Предложенное математическое описание с приемлемой для практических расчетов точностью описывает работу деаэрационных устройств различного конструктивного исполнения (ДЦВ, КД и ДКС).

Исследования параметрической чувствительности модели применительно к деаэратору ДКС показали, что эффект деаэрации уменьшается при увеличении гидравлической нагрузки деаэратора при всех значениях температуры воды перед ним. Это обусловлено соответствующим изменением времени пребывания воды в зоне разрежения. Наибольшее же влияние на эффективность деаэрации оказывает начальный перегрев воды относительно температуры насыщения, соответствующий давлению в деаэраторе. Выявлено, что теоретически в устройствах рассматриваемого типа можно добиться значений эффекта деаэрации 0,985 и более. Однако на практике такие значения оказываются недостижимыми ввиду наличия ограничений по максимальному расходу выпара, обусловленных пропускной способностью начального участка тракта отсоса выпара. Эти выводы позволяют определить направления дальнейшего совершенствования деаэраторов ДКС.

Полученные теоретические данные и результаты расчетов могут быть использованы при решении задач совершенствования конструкций деаэрационных устройств рассматриваемых типов, а также при обосновании их использования в технологических системах и установках ТЭС.

Список литературы

1. Оликер И.И. Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.

2. **Зимин Б.А.** Проблемы деаэрации воды в энергетике и способ их решения // Новости теплоэнергетики. – 2006. – Вып. 1. – С. 40–44.

3. **Шатова И.А., Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В.** Выбор схемы включения прямоточных деаэрационных устройств // Материалы IV Российской науч.-практ. конф. «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования». – Иваново, 2005. – С. 63–65.

4. **Повышение** эффективности технологических систем ТЭС с применением кавитационных деаэрационных устройств / Г.В. Ледуховский, Ю.Е. Барочкин, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 1. – С. 5–13.

5. **Абиев Р.Ш., Васильев М.П., Доильницын В.А.** Исследование процесса вакуумной дегазации воды в вихревом струйном аппарате // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2015. – № 28(54). – С. 64–69.

6. **Кудинов А.А., Шамшурина Г.И., Борисова Н.В.** Разработка и исследование опытного вакуумно-кавитационного деаэратора // Энергетик. – 2009. – № 10. – С. 29–31.

7. **Исследование** начального эффекта при десорбции растворенного кислорода в деаэраторах перегретой воды / Ю.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 5–10.

8. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

9. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы. – Ульяновск, 2003. – 560 с.

10. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

11. **Heinhold I.** Ingenieur statistic. – München; Wien: Springer Verlag, 1964. – 352 p.

12. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1 / пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

References

1. Olikier, I.I. *Termicheskaya deaeratsiya vody v otopitel'no-proizvodstvennykh kotel'nykh i teplovykh*

setyakh [Thermal deaeration of water in heating and industrial boilers and heat networks]. Leningrad: Stroyizdat, 1972. 137 p.

2. Zimin, B.A. *Novosti teplosnabzheniya*, 2006, issue 1, pp. 40–44.

3. Shatova, I.A., Barochkin, E.V., Ledukhovskiy, G.V. *Vybor skhemy vlyucheniya pryamotochnykh deaeratsionnykh ustroystv* [The choice of a connection scheme of direct-flow deaerator devices]. *Materialy IV Rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Povyshenie effektivnosti teploenergeticheskogo oborudovaniya»* [Proceedings of the IV Russian scientific and practical conference «Increasing of efficiency of heat power equipment»]. Ivanovo, 2005, pp. 63–65.

4. Ledukhovskiy, G.V., Barochkin, Yu.E., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 1, pp. 5–13.

5. Abiev, R.Sh., Vasil'ev, M.P., Doil'nitsyn, V.A. *Izvestiya SPbGTI(TU)*, 2015, no. 28(54), pp. 64–69.

6. Kudinov, A.A., Shamshurina, G.I., Borisova, N.V. *Energetik*, 2009, no. 10, pp. 29–31.

7. Barochkin, Yu.E., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Barochkin, E.V. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 5–10.

8. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 1971. 784 p.

9. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ul'yanovsk: UGTU, 2003. 560 p.

10. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003. 479 p.

11. Heinhold, I. *Ingenieur statistic*. München; Wien: Springer Verlag, 1964. 352 p.

12. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy analiz v 2 kn., kn. 1* [Applied Regression Analysis in 2 books, book 1]. Moscow: Finansy i statistika, 1986. 366 p.

Barochkin Yuriy Evgenyevich,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Barochkin Yuri Evgenievich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Post-graduate student of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskays St, 34, Building B (V), Room 408,
tel.: (4932) 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ledukhovskiy Grigoriy Vasilievich,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru
Ledukhovskiy Grigory Vasilievich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskays St, 34, Building B (V), Room 408, tel.: (4932) 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru
Zhukov Vladimir Pavlovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral degree), Professor, Head of the Applied Mathematics Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskays St, 34, Building A, Room 202,
tel.: (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Горшенин Сергей Дмитриевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru
Gorshenin Sergei Dmitrievich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskays St, 34, Building B (V), Room 408,
tel.: (4932) 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

УДК 621.187.11

Выбор реагентов и технологических условий химической очистки от отложений испарительных труб паровых котлов

А.Ю. Федорова, Е.Н. Бушуев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: admin@xste.ispu.ru

Состояние вопроса. Одним из основных факторов, влияющих на срок службы испарительных труб паровых котлов, является состояние их внутренних поверхностей нагрева. Для предотвращения повреждений испарительных труб проводятся периодические химические очистки этих поверхностей от отложений. В настоящее время для проведения таких очисток предлагается ряд новых моющих реагентов. При этом недостаточно данных о влиянии состава моющего раствора, его температуры и длительности очистки на техническую эффективность очистки, скорость и полноту удаления отложений. В связи с этим необходимо провести исследования по определению скорости очистки поверхности экранных труб от эксплуатационных отложений при использовании различных моющих реагентов и условий ее проведения.

Материалы и методы. Исследование образцов испарительных труб паровых котлов проведено с применением метода травления в условиях нагрева и без него. Для химической очистки использованы ингибированная соляная кислота, Антиржавин, Дескам, Auge Pro Ac. Определения удельной загрязненности и химического состава отложений проведены согласно требованиям СО 34.37.306-2001.

Результаты. В ходе лабораторного исследования получены зависимости скорости удаления бугорчатых и равномерных отложений, а также скорости коррозии металла испарительных труб от вида моющего раствора реагента, температуры и длительности очистки. Установлено, что скорость очистки образцов труб от равномерных и бугорчатых эксплуатационных отложений в кислотных растворах исследованных реагентов на 15–30 % больше, чем в растворе ингибированной соляной кислоты.

Выводы. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при выборе технологии проведения кислотной очистки, для снижения ее продолжительности с обеспечением наименьшей остаточной удельной загрязненности поверхности металла в условиях, наиболее приемлемых для промышленных объектов.

Ключевые слова: паровой котел, испарительные трубы, эксплуатационные отложения, химическая очистка, моющий реагент, соляная кислота, удельная загрязненность, метод травления, скорость очистки